

# **DESENVOLVIMENTO DE UM NOVO MODELO DE TRANSMISSÃO PARA AUTOMÓVEIS UTILIZANDO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE)**

**Mário César Reis Bonifácio<sup>1</sup>**

Universidade Paulista (UNIP) - Av. Comendador Enzo Ferrari, 280 - CEP: 13043-370 - Campinas SP.  
mario.bonifacio@zipmail.com.br

**Isley de Alencar Júnior<sup>2</sup>**

General Motors do Brasil - Av. General Motors, 1959 – CEP: 12201-970 - São José dos Campos SP.  
isley@directnet.com.br

**Resumo:** Durante processo de nacionalização de um determinado componente da transmissão houve grandes dificuldades, na medida em que os padrões ajustados para um componente similar não foram satisfatórios para a nova realidade. Para evitar o método da tentativa e erro, o objetivo deste trabalho foi utilizar a metodologia de Delineamento de Experimentos (DOE) para a determinação de uma superfície ótima de resposta. Os resultados obtidos comprovam a eficácia e viabilidade do uso desta técnica no desenvolvimento de novos processos.

**Palavras-chave:** delineamento de experimentos, setor automotivo, processos.

## 1. INTRODUÇÃO

Como resultado dos acordos de 92 e 93 e da concessão de benefícios adicionais aos carros populares, a indústria automobilística brasileira vivenciou um verdadeiro *boom* de crescimento. Conforme pode ser observado através da figura 1.1, após a primeira migração das principais montadoras de veículos na década de 50, o Brasil vive neste final de século um processo de industrialização que está alterando profundamente a base estrutural do setor automotivo. Novas montadoras se instalaram no país, trazendo na bagagem novas tecnologias nas fábricas e nos carros. (ANFAVEA, 2004)

Aliado a esses acordos, um amplo conjunto de medidas faz-se necessário para a manutenção e crescimento das taxas de produção que, conforme a figura 1.1, têm apresentados ligeiras oscilações nos últimos anos. O crescente processo de nacionalização dos componentes, estimulados pelas instabilidades do dólar, poderia ser uma importante alternativa para se aumentar os índices de qualidade/produtividades registrados pelo complexo automobilístico brasileiro. (O Estado de São Paulo, 2003).

Neste sentido, a Transmissão denominada F 17 PLUS e representada na figura 1.2 é um dos mais recentes projetos de transmissão da GM *Powertrain*, com características inovadoras para ser utilizado em motores de alto torque e elevada potência. Inicialmente importada, o que ocasionava a elevação dos custos, foi proposto pela referida planta uma nacionalização dos componentes desta transmissão. Neste processo, uma das dificuldades encontradas residia no fato de que os padrões para a retífica da engrenagem de 2<sup>a</sup> ordem e, também representados pela figura 1.2, apresentavam resultados muito

diferentes quando comparados com um produto similar. Recorrendo ao método por tentativas, o problema continuou sem solução devido aos resultados insatisfatórios obtidos, o que motivou a realização deste trabalho.

Portanto, o objetivo deste artigo foi analisar os parâmetros da máquina, nesse caso, uma retificadora, que exercem influência na variável de resposta pretendida<sup>1</sup>, lançando mão de um método estatístico de Delineamento de Experimentos (DOE).

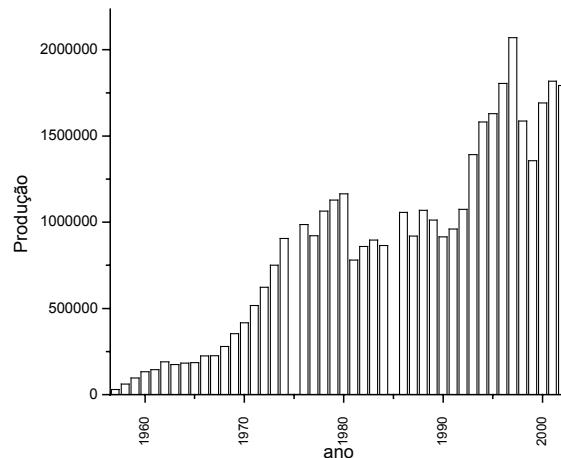


Figura 1.1 – Produção de Veículos nos últimos anos, ANFAVEA (2003).



Figura 1.2 – Modelo da Transmissão F 17 PLUS e Engrenagem de 2<sup>a</sup> ordem

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 – Análise Fatorial e Superfície de Resposta

A análise do tipo fatorial tem como objetivo reduzir a um número administrável muitas variáveis que formam um grupo e se sobrepõe às características de mensuração. Quando não se tem a relação

<sup>1</sup> Como se verá mais adiante, a variável de resposta a ser medida, altura do dente, para o referido processo, será mais adequada quanto menor for o seu valor.

variável dependente X variável independente, encontrada numa situação de dependência, é substituída por uma matriz de intercorrelação entre diversas variáveis, nenhuma das quais como dependente da outra. Esse método transforma um conjunto de variáveis compostas ou componentes principais que não são correlacionados uns com os outros. Essas combinações lineares de variáveis, chamadas de fatores, responde pela variação nos dados como um todo.(Montgomery & Runger, 2003).

Para o presente estudo, tendo em vista históricos dos processos anteriores, acredita-se que, em situações envolvendo retíficas em engrenagens, a relação encontrada é a do tipo variável dependente x variável independente, onde o modelo obedece a seguinte nomenclatura:

$$f(x) = f(x_1, x_2, x_3)$$

Sendo:

$F(x)$  = variável dependente (resposta) altura do dente da engrenagem

$x_1$  = inclinação da sonda (ângulo)

$x_2$  = Distância entre a sonda e a engrenagem<sup>2</sup>

$x_3$  = rotação do eixo de fixação da peça

Portanto, o modelo conhecido sugere que a predição da altura do dente, a variável de resposta, tem como variáveis que exercem influência os parâmetros definidos como  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ . Partindo deste pressuposto, resta saber quais os melhores valores que minimizam a variável pretendida. Esta aproximação, muitas vezes é obtida através de muitos ensaios, recorrendo ao método das tentativas e gerando um grande desperdício de tempo, o que motivou a adoção de um delineamento de experimentos (DOE) através da técnica de superfície de resposta. A variável dependente (altura do dente) é vista como uma superfície, em função dos fatores que recebem variação, denominadas de variáveis dependentes ou fatores.

## 2.1 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O modelo matemático utilizado foi o ajustar uma superfície de resposta utilizando o método semelhante ao proposto por Choudrury & El-Baradie em 1998, através do ajuste de um planejamento fatorial  $2^3$  para uma superfície de resposta dada através de um polinômio do 2º grau<sup>3</sup>. Para a construção deste modelo foi utilizou-se um experimento baseado em 20 corridas, sendo oito experimentos ( $2^3$ ) do planejamento fatorial, mais quatro pontos replicados duas vezes (Modelo da Composição Cubo Central) e ainda, mais os pontos centrais replicados quatro vezes. Além desta replicação, as corridas também foram aleatorizadas, procedimento básico em estatística. A tabela 2.1 representa o planejamento fatorial do tipo  $2^3$ , enquanto a tabela 2.2 traz todos os pontos e suas respectivas respostas para a construção da superfície de resposta.

Tabela 2.1 – Parâmetros de Máquina para o Planejamento Fatorial  $2^3$

	Velocidade $X_1$ (rpm)	Ângulo $X_2$ (grau)	Distância $X_3$ (mm)
Nível 1	950	35	0,90
Nível 2	1050	55	1,10
Média	1000	45	1,00

<sup>2</sup> O objetivo desta sonda de identificação e posicionamento é reconhecer a geometria da peça e transformar seus parâmetros para um programa do tipo CNC.

<sup>3</sup> O Planejamento fatorial do tipo  $2^3$  significa que há três variáveis de influencia variando numa faixa de 2 níveis, um mínimo e outro máximo.

Tabela 2.2 – Valores para a Superfície de Resposta - Modelo da Composição Cubo Central

Teste	Velocidade	Ângulo	Distancia	Altura do dente
1	950	35	0,9	9,2505
2	1050	35	0,9	9,9115
3	950	55	0,9	9,266
4	1050	55	0,9	9,9435
5	950	35	1,1	9,2595
6	1050	35	1,1	9,9455
7	950	55	1,1	9,978
8	1050	55	1,1	9,899
9	915,91	45	1	9,255
10	1084,09	45	1	9,9005
11	1000	28,1821	1	9,9885
12	1000	61,8179	1	9,955
13	1000	45	0,83182	9,2497
14	1000	45	1,16818	9,9585
15	1000	45	1	9,2535
16	1000	45	1	9,2872
17	1000	45	1	9,2483
18	1000	45	1	9,2591
19	1000	45	1	9,3005
20	1000	45	1	9,2903

### 3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Completada a tabela 2.2, o primeiro passo foi verificar a validação do modelo, fato este realizado através de um pacote estatístico<sup>4</sup>, o qual procurou verificar qual o modelo mais adequado, dentre os quatro destacados a seguir:

- a) Modelo completo de segunda ordem
- b) Modelo Linear
- c) Linear + Interação
- d) Linear + Quadrático

Feita essa simulação, o melhor ajuste foi para o polinômio completo de segunda ordem dado pela representação abaixo:

$$F(x) = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + \text{erro}$$

Em seguida, utilizando-se também do software Minitab, determinou-se os coeficientes para a regressão, a fim de se avaliar quais parâmetros são significativos no modelo de segunda ordem. Esses valores estão representados na tabela 3.1.

<sup>4</sup> O Programa utilizado foi o Minitab.

Tabela 3.1 - Coeficientes da Regressão para o polinômio de 2<sup>a</sup> ordem

	<b>Coeficiente de Regressão</b>	<b>P valor</b>
Constante ( $x_0$ )	32,875	0,106
Velocidade ( $x_1$ )	-0,044	0,175
Ângulo ( $x_2$ )	-0,096	0,408
Distancia ( $x_3$ )	-4,568	0,714
Velocidade quad. ( $x_1^2$ )	0,000	0,024
Ângulo quad. ( $x_2^2$ )	0,2	0,000
Distância quad. ( $x_3^2$ )	10,368	0,015
$x_1x_2$	0	0,079
$x_1x_3$	-0,018	0,085
$x_2x_3$	0,078	0,133

A um nível de significância de 95%, as variáveis estatisticamente significantes, que possuem  $p < 0,05$ , foram velocidade quadrática ( $x_1^2$ ), ângulo quadrático ( $x_2^2$ ) e distância quadrática ( $x_3^2$ ). Portanto, os demais coeficientes, juntamente com a velocidade quadrática (coeficiente zero) foram descartados do modelo, o qual ficou reduzido a:

$$F(x) = 0,2x_2^2 + 10,368x_3^2$$

As figuras 3.1, 3.2 e 3.3 representam as superfícies de resposta para cada uma das combinações existentes entre as variáveis.

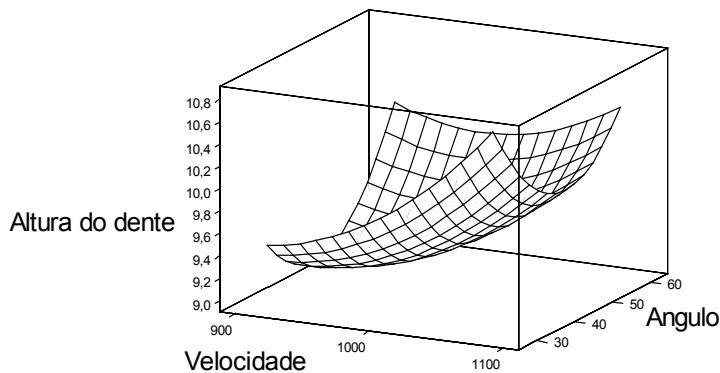


Figura 3.1 – Superfície de resposta para velocidade x ângulo

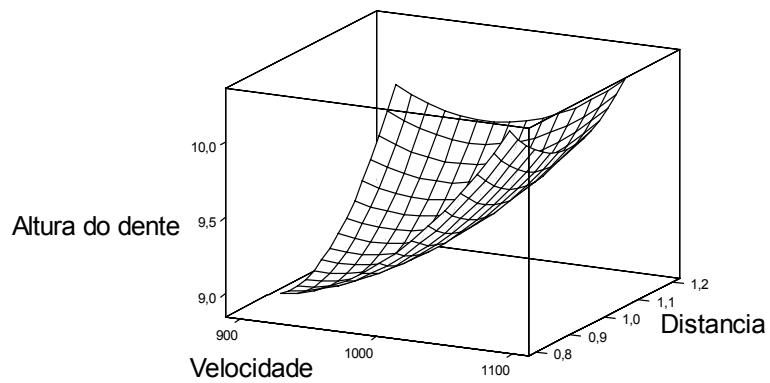


Figura 3.2 – Superfície de resposta para velocidade X distância.

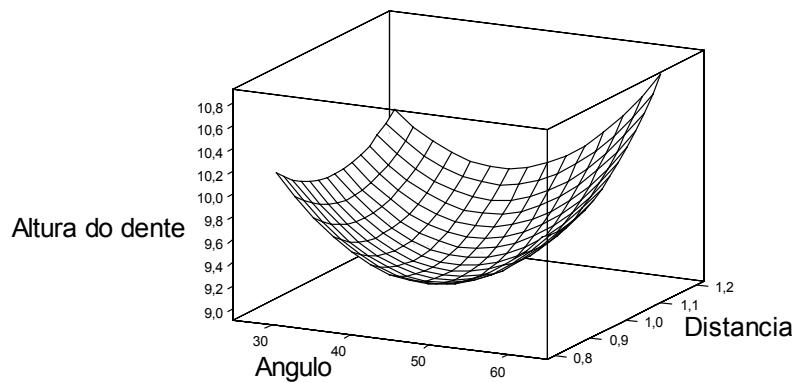


Figura 3.3 - Superfície de resposta ângulo x distância.

Uma análise do polinômio obtido, bem como das suas respectivas superfícies de respostas, permitiu concluir que, o principal fator que exerce influência, com vistas a minimizar a variável de resposta pretendida, é a distância entre a sonda e a engrenagem, a qual deve estar situada no nível mínimo. Embora o fator ângulo apareça no modelo do polinômio, sua influência é um tanto quanto menor e esta deve estar compreendida no nível médio, dado que nos ângulos extremos há um aumento da variável de resposta. Finalmente, a velocidade que não aparece no modelo do polinômio, caso considerada separadamente com as outras duas variáveis, deve ser a menor possível.

#### 4. CONCLUSÕES

A principal dificuldade para realizar este procedimento experimental deveu-se ao fato da disponibilidade de uso da máquina, uma vez que seu uso é bastante exigido durante o processo produtivo. Outro fator que dificultou a realização dos testes foi a aleatorização das corridas, o que exigiu constantes ajustes dos parâmetros da máquina.

A superfície de resposta, para este caso, foi do segundo grau e se mostrou viável como uma primeira aproximação, sem recorrer ao método de tentativas. Partindo desta, seria possível realizar alguns refinamentos no sentido de obter pontos ótimos mais adequados, como, por exemplo, variando os níveis escolhidos.

Mesmo conhecendo históricos de processos anteriores, antes de recorrer a utilização da superfície de resposta, talvez seja interessante realizar procedimentos fatoriais com o intuito de verificar quais as variáveis realmente são as mais importantes.

#### 5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho

#### 6. REFERÊNCIAS

- ANFAVEA, 2004. Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br>>. Acesso em: 15 jan. 2004.
- Estado de São Paulo, 2003. Ter Carro, Sonho Impossível para Maioria. São Paulo, 8 set 2003.
- Montgomery, D.C; Runger, G.C, 2003. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. Editora LTC – Rio de Janeiro.
- Choudrury, I. A; El-Baradie, M. A, 1998 "Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength" Dublin – Ireland.

### **DEVELOPMENT OF A NEW MODEL OF TRANSMISSION FOR AUTOMOBILES USING DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)**

**Mário César Reis Bonifácio<sup>1</sup>**

Universidade Paulista (UNIP) - Av. Comendador Enzo Ferrari, 280 - Zip Code: 13043-370 - Campinas  
SP. [mario.bonifacio@zipmail.com.br](mailto:mario.bonifacio@zipmail.com.br)

**Isley de Alencar Júnior<sup>2</sup>**

General Motors of Brazil - Av. General Motors, 1959 - Zip Code: 12201-970 - São José dos Campos  
SP. [isley@directnet.com.br](mailto:isley@directnet.com.br)

**Abstract:** During process of nationalization of a kind component of the transmission there were great difficulties, in the measure in that the adjusted patterns for a similar component were not satisfactory for new process. To avoid the method of the attempt and mistake, the objective of this work was to use the design of experiments for the determination of the response surface. The obtained results prove the effectiveness and viability of the use of this technique in the development of new process.

**Key words:** *design of experiments, automotive sector, process*